

ОСОБЕННОСТИ АККУМУЛЯЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В РЕГЕНЕРАТОРАХ

Торопов Е.В.*, Волкинд Д.К.**

*ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный Университет (НИУ)»,
г. Челябинск, Россия,

**ГК «ПЛМ-УРАЛ» – «Делкам-Урал», г. Екатеринбург, Россия

В работе рассмотрены основные особенности динамики нагрева насадочно-го элемента регенератора на основе методики единичного нагрева с определением количества аккумулированной теплоты в функции чисел Био и Фурье. Процесс характеризуется тремя стадиями нагрева – стадией роста скорости нагрева с увеличением числа Био, стадией постоянной скорости и стадией снижения скорости. Сформулированы зависимости, позволяющие рассчитать параметры стадии интенсивного нагрева. Практическое использование разработанной методики возможно как при проектных расчетах, так и при режимной оптимизации регенераторов.

Ключевые слова: регенератор, теплообмен, аккумуляция теплоты.

The paper discusses the main features of the dynamics of the heating element of the regenerator packing based on a single heating methods with a certain amount of stored heat as a function of Bio and Fourier numbers. The process is characterized by three stages of heating – heating rate of growth stage with the number of Bio, constant speed stage and the stage speed reduction. Depending formulated, allowing to calculate the parameters of the stage of intense heat. The practical use of the developed method as possible during design calculations and optimization of the regime at the regenerators.

Keywords: regenerator, heat transfer, heat accumulation.

Задача регенеративного теплообмена с различными упрощениями и допущениями решалась многими авторами, самый обстоятельный аналитический обзор приведен в работе [1]. До широкого внедрения ЭВМ в расчетную практику методы расчетов характеризовались усреднением во времени уравнениям теплообмена, сведениям расчета регенератора к расчету рекуператоров с заменой коэффициента теплопередачи на коэффициент теплообмена и учету теплоаккумулирующих свойств насадки с помощью термического сопротивления насадки. Большинство аналитических работ в этом направлении различаются рекомендациями по расчету термического сопротивления насадки, включая, например, сравнительную оценку огнеупорных материалов по соотношению термических сопротивлений теплоаккумуляционных процессов [2]. При оценке влияния термического сопротивления аккумуляционных процессов на идеальный коэффициент регенерации при полном использовании поверхности теплообмена для трех модельных огнеупоров – динаса, шамота и корунда, составлен ряд термосопротивлений аккумуляционных процессов 1,00:1,30:1,63. Этот ряд свидетельствует о том, что при прочих равных условиях эффективнее проходят аккумуляционные процессы в динасовой насадке, а труднее всего – корундовой.

Широкое использование методов численного анализа тепловых процессов при аккумуляции в регенеративном теплообмене позволило автором

работы [1] рекомендовать при разработке методики расчетов регенераторов учитывать аккумуляционные процессы с помощью введения коэффициента массивности насадки m . Этот коэффициент предложено определять для тел трех канонических форм при $Fo \geq 1,5$: $m = 1 + Bi/k$, где коэффициент формы элемента насадки $k = 3; 4; 5$ соответственно для безграничной пластины, цилиндра бесконечной длины и шара.

Предлагается метод оценки аккумулирующих свойств насадки по относительному количеству аккумулированной теплоты при модельном одиночном нагреве от температуры t_0 до температуры t_{cp} , который позволяет выделить влияние не только теплофизических свойств насадочного материала, но и формы элементов насадки. Метод можно рекомендовать в качестве дополнения к предпроектным и конструктивным расчетам регенераторов.

Метод основан на решении дифференциального уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t, \quad (1)$$

где оператор Лапласа в одномерной постановке для тел канонических форм

$$\nabla^2 t_{пл} = \frac{\partial^2 t}{\partial \eta^2}; \quad \nabla^2 t_{ц} = \frac{\partial^2 t}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{\partial t}{\partial \eta}; \quad \nabla^2 t_{ш} = \frac{\partial^2 t}{\partial \eta^2} + \frac{2}{\eta} \frac{\partial t}{\partial \eta}. \quad (2)$$

Относительное количество теплоты $Q_{отн} = Q_{акк}/Q_{полн}$, аккумулированной элементом насадки, характеризующемуся числом $Bi = \alpha \eta / \lambda$, к моменту времени τ , входящему в число $Fo = \alpha \tau / \eta^2$, когда средняя по сечению элемента температура равна t_{cp} , определяется по зависимости [3]

$$Q_{отн} = 1 - \Theta_{cp}, \quad (3)$$

где $\Theta_{cp} = (t_{cp} - t_0)/(t_n - t_0)$; t_n – температура греющего теплоносителя, °С.

Уравнение теплопроводности (1) с детализацией (2) имеет решение при граничных условиях третьего рода ($t_n = \text{const}$, $\alpha = \text{const}$):

$$\Theta = \sum_{i=1}^{\infty} D_i C_i \exp(-\mu_i^2 Fo). \quad (4)$$

При наступлении регулярного режима ($Fo > Fo_{кр}$) возможен переход от суммы ряда к первому слагаемому, ввиду быстрой сходимости ряда:

$$\Theta_1 = A_1 \exp(-\mu_1^2 Fo), \quad (5)$$

и, в соответствии с теоремой о среднем,

$$\Theta_{1cp} = A_1^{cp} \exp(-\mu_1^2 Fo), \quad (6)$$

где $A_1 = D_1 C_1$, $A_1^{cp} = D_1 C_1^{cp}$.

**Значение основных величин для решения задачи об аккумуляции теплоты
элементами насадки**

	Пластина, $\eta \equiv x,$ $\mu_1 = Bi \cdot \text{ctg} \mu_1$	Цилиндр, $\eta \equiv r,$ $\mu_1 = Bi \cdot J_0(\mu_1)/J_1(\mu_1)$	Шар, $\eta \equiv r,$ $\mu_1 = (1 - Bi) \cdot \text{tg} \mu_1$
Величина D_1	$2 \sin \mu_1 / (\mu_1 + \sin \mu_1 \cos \mu_1)$	$2 J_1(\mu_1) / \mu_1 [J_0^2(\mu_1) + J_1^2(\mu_1)]$	$2 (\sin \mu_1 - \mu_1 \cos \mu_1) / (\mu_1 - \sin \mu_1 \cos \mu_1)$
Величина C_1	$\cos(\mu_1 X)$, где $X = x/x_0$	$J_0(\mu_1 R)$, где $R = r/r_0$	$\sin(\mu_1 R) / \mu_1 R$
Величина $C_1^{\text{ср}}$	$\sin(\mu_1) / \mu_1$	$2 J_1(\mu_1) / \mu_1$	$3 Bi / \mu_1^*$

* $3 Bi / \mu_1 = 3 (\text{tg} \mu_1 - \mu_1) / (\mu_1 \text{tg} \mu_1)$

Построенные по данным таблицы графические функции $Q_{\text{отн}} = f(Bi, Fo)$ для реально применяемых огнеупоров позволяют выделить три области значений функции. Первая область малых значений Bi характеризуется и малыми значениями $Q_{\text{отн}}$, для улучшения аккумуляционных процессов можно перейти на кривую с большим значением Fo , т. е. увеличить время нагрева насадки. Либо увеличить число Bi за счет увеличения коэффициента теплоотдачи α при сохранении размера η и коэффициента теплопроводности материала насадки λ . Увеличение Bi за счет увеличения размера η и снижения λ представляется нерациональным по вполне понятным причинам. Кроме того, вопрос с изменением λ достаточно неоднозначен, так он связан с другими теплофизическими показателями, а также с огнеупорностью и надежностью работы насадки.

Область средних значений Bi при $Fo = \text{const}$ характеризуется максимальной скоростью роста $Q_{\text{отн}}$, которая снижается при переходе к области больших значений Bi . В области средних значений есть участок, где угол наклона кривой $Q_{\text{отн}} = f(Bi, Fo)$ не изменяется, и этот участок должен быть дополнительно исследован.

Область больших значений Bi характеризуется постепенным снижением скорости роста $Q_{\text{отн}}$ с постепенным выходом на постоянное значение, которое характеризует максимальное значение аккумулированной теплоты при заданных условиях нагрева, причем увеличение этого значения возможно только при увеличении длительности нагрева. Увеличение числа Fo возможно пропорциональным увеличением времени нагрева τ , но в еще большей степени – за счет уменьшения размера элемента η , который входит в знаменатель Fo во второй степени. Деление на области кривой $Q_{\text{отн}} = f(Bi, Fo)$ по числам Bi с одной стороны достаточно условно, так как с увеличением Fo кривые смещаются влево в область низких значений Bi ; таким образом, те числа Bi , которые были малыми при малых Fo , переходят в область больших значений при увеличении Fo . С другой стороны, самостоятельное значение имеет точка перегиба на этой кривой, так как она характеризует изменение аккумуляционных процессов.

Эти данные свидетельствуют о том, что зависимость $Q_{\text{отн}}$ от Bi при $Fo = \text{const}$ имеет характер «кривой с насыщением»: при малых Bi увеличение $Q_{\text{отн}}$ с увеличением Bi идет по нарастающей, затем $dQ_{\text{отн}}/dBi$ достигает

некоторого постоянного значения, после которого значения производной снижаются вплоть до $Q_{\text{отн}} = \text{const}$. Отсюда следует, что максимальное значение скорости аккумуляции в зависимости от Bi достигается в области $d^2 Q_{\text{отн}} / dBi^2 = 0$, где изменяется кривизна линии $Q_{\text{отн}} = f(Bi)$ при $Fo = \text{const}$. Форма кривой $Q_{\text{отн}}$ свидетельствует о том, что аккумуляционные процессы подчиняются распределению Гаусса [3].

В соответствии с этими положениями можно получить

$$\frac{\partial Q_{\text{отн}}}{\partial Bi} = \left[2A_1^{\text{сп}} \frac{\partial \mu_1}{\partial Bi} Fo - \frac{\partial A_1^{\text{сп}}}{\partial Bi} \right] \exp(-\mu_1^2 Fo); \quad (7)$$

и далее

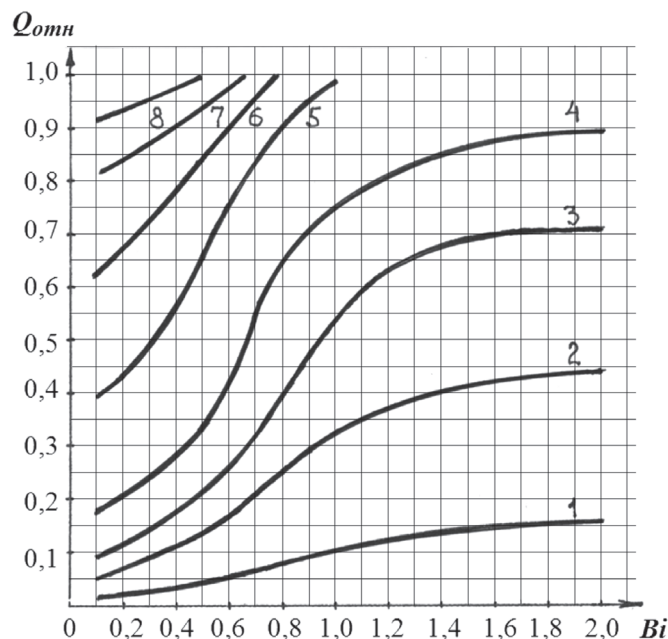
$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 Q_{\text{отн}}}{\partial Bi^2} = \exp(-\mu_1^2 Fo) & \left\{ \left[2Fo \left(\frac{\partial A_1^{\text{сп}}}{\partial Bi} \frac{\partial \mu_1}{\partial Bi} + A_1^{\text{сп}} \frac{\partial^2 \mu_1}{\partial Bi^2} \right) - \frac{\partial^2 A_1^{\text{сп}}}{\partial Bi^2} \right] - \right. \\ & \left. - 2Fo \left[2Fo A_1^{\text{сп}} \frac{\partial \mu_1}{\partial Bi} - \frac{\partial A_1^{\text{сп}}}{\partial Bi} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Приравняв нулю это выражение и решив полученную зависимость относительно Bi , получим значения Bi и Fo , отвечающие максимальной скорости аккумуляционных процессов:

$$\begin{aligned} \left(C_1^{\text{сп}} \frac{\partial D_1}{\partial Bi} + D_1 \frac{\partial C_1^{\text{сп}}}{\partial Bi} \right) \frac{\partial \mu_1}{\partial Bi} + D_1 C_1^{\text{сп}} \frac{\partial^2 \mu_1}{\partial Bi^2} - \frac{1}{2Fo} \left(C_1^{\text{сп}} \frac{\partial^2 D_1}{\partial Bi^2} + 2 \frac{\partial D_1}{\partial Bi} + D_1 \frac{\partial^2 C_1^{\text{сп}}}{\partial Bi^2} \right) = \\ = 2Fo D_1 C_1^{\text{сп}} \frac{\partial \mu_1}{\partial Bi} - C_1^{\text{сп}} \frac{\partial D_1}{\partial Bi} - D_1 \frac{\partial C_1^{\text{сп}}}{\partial Bi}. \end{aligned} \quad (10)$$

Полученное выражение (10), несмотря на некоторую громоздкость, позволяет достаточно просто определить абсциссу Bi или ординату Fo , отвечающие максимальной скорости аккумуляционных процессов. Производные первого и второго порядков, входящие в это выражение, должны быть определены в виде чисел тем или иным способом, и они входят в уравнение как константы. Тогда эта зависимость превращается в алгебраическое уравнение второго порядка относительно Bi или Fo , и это уравнение может быть решено обычным способом.

Для проверки достоверности полученных выражений для точки перегиба $Q_{\text{отн}} = f(Bi, Fo)$, которая соответствует максимальному значению аккумуляционных процессов, можно применить численный метод. Так, определив численное значение производных и других констант в окрестности конкретного числа Био, например, $Bi = 0,75$, и подставив их в формулу (10), получим значение числа Fo , соответствующее точке максимума аккумуляционных процессов $Fo_{\text{max}} = 1,4$, при этом $Q_{\text{отн}} = 0,50$. Это решение может быть проверено по графику (рисунок). Эти данные относятся к плоскому насадочному элементу, но аналогичные зависимости получены также для цилиндрического и сферического элементов.



Зависимость $Q_{отн}$ от числа Bi при заданном числе Fo :
 1 – $Fo = 0,1$; 2 – $Fo = 0,5$; 3 – $Fo = 1,0$; 4 – $Fo = 2,0$; 5 – $Fo = 5,0$; 6 – $Fo = 10,0$; 7 – $Fo = 20,0$; 8 – $Fo = 50,0$

Практическое применение полученных результатов можно связать с определением оптимальных значений аккумуляционных процессов в регенераторах, насадка которых составлена из отдельных ярусов (модулей), различающихся теплофизическими свойствами, формой и размером элементов насадки. В этом случае различие в аккумуляционных процессах модулей изменяет характер температурных полей по высоте насадки, что должно учитываться при выборе огнеупорных материалов и их расположении по высоте аппарата. Нет также принципиальных затруднений для применения разработанных методов к оценке работы кладки в агрегатах периодического действия – в агрегатах внепечной обработки расплава, а также для оценки длительности и энергозатратности переходных процессов в агрегатах непрерывного действия.

Список использованных источников

1. Шкляр Ф.Р. Доменные воздушнонагреватели (конструкция, теория, режимы работы) / Ф.Р. Шкляр, В.М. Малкин, С.П. Каишанова и др. – М.: Металлургия, 1982. – 176 с.
2. Торопов, Е.В. Влияние теплофизических свойств огнеупорного материала на эффективность теплообмена в регенеративной насадке / Е.В. Торопов, Л.Е. Лымбина, Д.К. Волкинд // Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: история, современное состояние, будущее: сб. докладов международной научно-практической конференции. В 2-х частях. Ч. 1. – Екатеринбург. – 2014. – С. 447–452.
3. Лыков, А.В. Теплообмен: (Справочник). – М.: Энергия, 1978. – 480 с.